

## YERALTI KABLOLARINDA SİLİNDİRİK EKLANLAMANIN PERFORMANS ANALİZİ

### PERFORMANCE ANALYSIS OF CYLINDRICAL SHIELDING IN UNDERGROUND CABLES

Selim KÖROĞLU<sup>1\*</sup>, Nurettin UMURKAN<sup>2</sup>, Selami KESLER<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektronik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye.  
skoroglu@pau.edu.tr, skesler@pau.edu.tr

<sup>2</sup>Elektrik Mühendisliği Bölümü, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.  
umurkan@yildiz.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 07.11.2013, Kabul Tarihi/Accepted: 02.12.2013  
\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2015.64872  
Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Üç fazlı yeraltı kabloları için silindirik ekranlama etkinliği, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanarak çeşitli ekran malzemeleri için incelenmiştir. Bu SEY modeli ferromanyetik ekran malzemelerinin doğrusal olmayan histeresis davranışlarını da dikkate almaktadır. Kullanılan ekranlar silindirik yapı ve ekran içerisinde kabloların yerleştirilmesi ise düz şekildedir. Aynı ekran geometrisinde farklı ekran malzemelerinin ekranlama etkinliği karşılaştırılmıştır. Burada kullanılan ekran malzemelerinden ikisi ferromanyetik özellikli lineer olmayan histeresis davranışlarını sahip (Arcelor-Mittal tarafından üretilen Magnetil ve DX52) ekranlardır. Diğerleri ise ferromanyetik olmayan yüksek iletkenlikli ekran (Alüminyum) malzemesidir. Bu çalışmada; ekran yarıçapı, kablolardan geçen akımın genişliği ve ekran kalınlığı gibi parametrelerin ekranlama etkinliği üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Ekranlama etkinliği açısından en iyi ekran malzemesinin Magnetil olduğu görülmüştür. Sayısal yöntem eksansız durum için deneysel sonuçlarla da doğrulanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Manyetik ekranlama, Silindirik ekran, Sonlu elemanlar yöntemi

#### Abstract

The shielding efficiency of cylindrical shields for three phase underground cable is investigated for several shields material using finite element method (FEM). This FEM model takes into account the nonlinear hysteretic behavior for ferromagnetic material in the shield. The shields are cylindrical shaped and the power cables are positioned in flat configuration. The shielding efficiency is compared for shields with the same geometry but several shielding materials with nonlinear hysteretic behavior (Magnetil and DX52, both from Arcelor-Mittal firm) and a non-ferromagnetic and electrically conducting shielding material (Aluminium). The paper investigates the influence of several parameters on shielding efficiency: the size of the shield radius, the current amplitude in the cable and the thickness of the shield. Magnetil shield material is the best in terms of shielding performance. The numerical models are validated with experimental results for without shield.

**Keywords:** Magnetic shielding, Cylindrical shield, Finite element method

## 1 Giriş

Ortamda istenmeyen manyetik alanların hassas elektrik-elektronik cihazların çalışmalarını arzu edilmez bir biçimde etkilediği gibi insan ve canlı sağlığı üzerinde de olumsuz etkiler oluşturduğuna yönelik önemli kaygı ve bulgular vardır. Bu nedenle, elektromanyetik uyumluluk üzerine yapılan en önemli çalışma konularından birisi de manyetik ekranlamadır [1],[2].

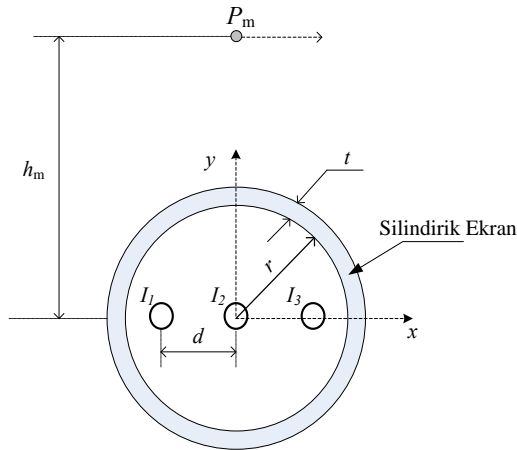
Elektromanyetik alanların ekranlaması konusundaki çalışmalar 70-80 yıl öncelerine uzanmaktadır. Konu önemli nedeniyle güncelliğini halen korumakta ve sürdürmektedir. Aşırı düşük frekanslı (ELF) manyetik ekranlama çalışmalarının öncülerinden olan Levy sonsuz genişlikte ince düz ekranlar için ekranlama etkinliği ile ilgili çalışmalarını rapor etmiştir [3]. Schelkunoff tarafından yapılan manyetik ekranlamaya ilgili çalışmada iletim hattı yaklaşımı (Transmission Line Approach) kullanılmıştır. Bir kaynaktan yayılan manyetik dalganın bir kısmı ekrandan geri yansır, bir kısmı ekran tarafından yutulur ve bir miktarı ekrandan yayılarak geçer [4]. Bu teori için pratik ekranlama ifadeleri Schulz ve arkadaşları tarafından verilmiştir [5]. Hasselgren ve Luomi tarafından yapılan çalışmada, manyetik ekranlama etkinliği kapalı ve açık ekran yapıları için incelenmiştir. Basit ekran geometrileri için analitik yöntemle çözüm yapılmıştır. Buna

karşın, karmaşık yapıli geometrilerdeki çözümlerlerde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Ekran malzemesi olarak yüksek iletkenlikli ve ferromanyetik malzemeler tercih edilmiştir. Ferromanyetik malzemeyle yapılan ekranlamada, ekran geometrisinin kaynağı saracak şekilde ve küçük boyutlu olması durumunda daha iyi sonuçlar alındığı gösterilmiştir. Aynı zamanda, açık ekranlama yapılması durumunda kaynağa yakın yerlerde daha yüksek ekranlama sağlandığı gözlenmiştir. Yüksek iletkenlikli malzemeyle yapılan ekranlamada ise büyük boyutlu ekranların kullanılmasının daha uygun olduğu vurgulanmıştır. Ekranın alan kaynağına çok yakın olması durumunda ise ekranlama etkinliğinin azaldığı tespit edilmiştir [6].

Literatürde manyetik ekranlama probleminin çözümünde birçok teknik önerilmiştir. ELF manyetik alan ekranlama probleminin çözümünde moment yöntemi önerilmiştir [7]. Tek ve çift katmanlı sonsuz genişlikteki düz ekranların ekranlama etkinliği hesabı için yaklaşık çözüm yapan basit bir teknik geliştirilmiştir [8]. Sonlu genişlikteki mükemmel olmayan malzeme özelliklerine sahip düzlemsel ekranlar için basit hibrit bir hesaplama yöntemini esas alan başka bir çalışmada kaçak manyetik alanlar ve dalma derinliği dikkate alınmıştır [9]. Yenikaya tarafından sunulan çalışmada, açıklığa sahip bir kutunun ekranlama etkinliği ve depolanan elektriksel enerjinin hesabı için frekans domeninde moment

yöntemi ile kenar tabanlı vektörel sonlu elemanlar yöntemini birleştiren hibrit bir formülasyon geliştirilmiştir [10]. Düzgün dağılımlı bir manyetik alan içerisinde kalan, silindirik ferromanyetik (Fe-Si) ekran için ekranlama verimliliğinin hesabı analitik, sonlu elemanlar ve yapay sinir ağları gibi üç farklı yöntem kullanılarak yapılmış ve yöntemlerin performansları karşılaştırılmıştır [11]. Güç frekanslı sistemlerin silindirik ekranla ekranlanması üzerine bir çalışmada, malzemenin elektriksel ve manyetik özelliklerinin sabit olduğu kabul edilmiş, manyetik alan kaynağının da içeride olduğu durum dikkate alınmıştır. Bu şartlar altında, tek katmanlı silindirik ekranlamanın hesabı için basitleştirilmiş formüller önerilmiştir [12]. Literatürde yeraltı kablolarının ekranlanmasında kullanılan U-biçimli oluk ve üzeri düz plaka şeklinde kapaklı ekran yapısı için analiz ve ekranlama ile meydana gelen kayıpların incelenmesine ait çalışmalar da bulunmaktadır [13],[14].

Özellikle basit ekran yapısı olan silindirik ekranlamaya ait birçok analitik çalışma ve basitleştirilmiş formül vardır. Fakat bu çözüm yöntemleri çoğu zaman ekranın lineer olmayan etkisini dikkate almamakta ya da yapılan bazı varsayımlar sebebiyle yeterli derece doğru çözüm vermemektedir. Bu tür problemlerin çözümünde, lineer olmayan ekran davranışların dikkate alınması ve sistemin kolaylıkla modellenebilmesi gibi özellikleri nedeniyle bir sayısal çözümleme tekniği olan SEY yöntemini öne çıkarmaktadır. Bu çalışmada, yeraltı kablolarının ekranlanmasında kullanılabilecek silindirik yapı bir ekranlama problemi farklı ekran malzemeleri için parametrik olarak analiz edilmiştir. Prensipten Şekil 1’de verilen geometrik yapıdan görüldüğü gibi kaynak bölgesi ekranın içinde, ekranlanacak bölge ise ekranın dışında kalmaktadır. Buradaki amaç, kabloların dış ortama yaydıkları manyetik alan seviyelerini azaltmaktır.



Şekil 1: Yeraltı kablolarının xy-düzlemindeki yerleşimi ve ekran geometrisi.

## 2 Manyetik Ekranlama ve Problemin Tanımlanması

Ekranlama, elektromanyetik kaynakla etki noktası arasında uygun yapı ve özellikte malzemeler yerleştirilerek yapılan alan azaltma uygulamasıdır. Ekran tabakasının kaynağa ölçüm noktası arasında yerleştirilmesi, dış ortamdaki alanda bir azalmaya yol açacaktır. Genelde, bu amaç için yüksek iletkenli malzemeler (alüminyum, bakır) veya yüksek manyetik geçirgenlikli (ferromanyetik) malzemeler (demir, düşük karbonlu çelik,  $\mu$ -metal) kullanılır. Yüksek iletkenlikli

malzemelerde ekranlama prensibi girdap akımlarına dayanır. Yani manyetik alandan dolayı ekran malzemesi içerisinde “girdap akımı” oluşur. Bu akımlar kendini oluşturan alana zıt yönde olduklarından manyetik alan metal tarafından reddedilir. Metalin içinde düşük akı yoğunluğu oluşacak şekilde alan ekranın yüzeyine paralel şekillenmeye zorlanır. Yüksek geçirgenlikli malzemelerin ekranlama prensibi ise “akı yönlendirilmesi” (“Flux shunting”) yoluyla olur. Yüksek manyetik geçirgenliğe sahip ferromanyetik malzemelerde akı metalin içine doğru, alana dik olarak ve yoğunlukla ekrandan geçmeden ekran içi boyunca şekillenir [15].

Ekranlamanın performansını ifade eden önemli ölçütlerden birisi ekranlama etkinliğidir. Ekranlama etkinliği, ortamdaki manyetik alan seviyesinin, ekranlama sonrasında ölçülen seviyeye oranı olarak kısaca tarif edilebilir. Ekranlama etkinliği (SE), desibel cinsinden,

$$SE = 20 \log_{10} (|B_0|/|B_s|) \quad (1)$$

hesap edilir. Burada  $B_0$  ekransız durumdaki manyetik akı yoğunluğu,  $B_s$  ise aynı gözlem noktası için ekranlı durumdaki manyetik akı yoğunluğunu göstermektedir.

Simülasyonu gerçekleştirilecek sistemin geometrik yerleşimi Şekil 1’de gösterilmiştir. Tablo 1’de ise sistem büyüklükleri ve onların ölçüleri verilmiştir. Kullanılan kablolar dairesel kesitli olup iletken yarıçapları 22.57 mm’dir. Her bir kablo 1600 mm<sup>2</sup> iletken kesit alanına sahiptir. Yapılan çalışmada, problem daha çok manyetik alanlar yönünde incelediği için toprağın elektriksel özellikleri dikkate alınmamış sanki bir hava gibi davrandığı kabul edilmiştir.

Bu çalışmada, ekranlama performansını etkileyen parametrelerden; ekranın yarıçapı ( $r$ ), ekranın kalınlığı ( $t$ ), kablolardan geçen akımın genliği ( $I$ ) gibi parametreler dikkate alınmıştır. Bu nedenle, ekranlama faktörü |SE|,

$$|SE| = SE[r, t, I] \quad (2)$$

biçiminde çok parametrelili bir fonksiyon olarak tanımlanabilir. Bu parametrelerinin farklı malzemeler için silindirik ekranlamada incelenmesi konunun pratik uygulayıcılarına bir rehber niteliğindedir.

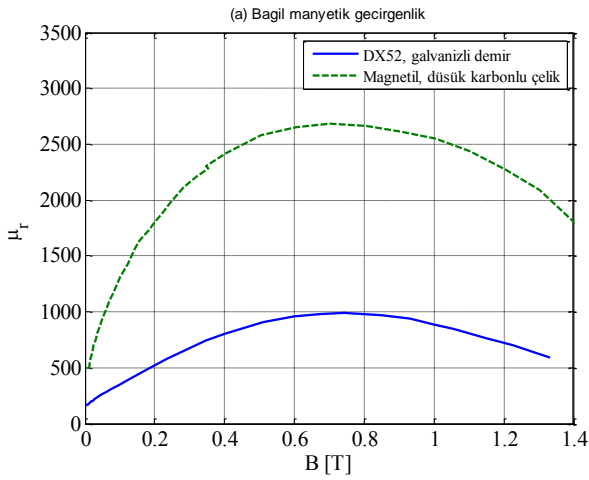
Tablo 1: Simülasyonu gerçekleştirilecek sisteme ait büyüklükler ve ölçüleri.

Büyükük	Ölçüsü	Tanımı
$h_m$	1.00 m	Gözlem noktasından kablolara olan uzaklık
$t$	3 mm	Ekran kalınlığı
$r$	0.20 m	Silindirik ekran yarıçapı
$d$	0.10 m	Kablolar arası mesafe
$f$	50 Hz	Frekans
$I_1, I_2, I_3$	750 A (rms)	Kablolardan geçen akımın etkin değeri
$q$	*1600 mm <sup>2</sup>	Her bir kablunun kesit alanı

## 3 Problemin Sonlu Elemanlar Yönetimi ile Modellenmesi

Problemin çözümünde sistemdeki lineer olmayan etkileri doğru bir biçimde dikkate alması ve yüksek doğrulukla bir çözüm sonucu vermesi nedeniyle SEY yöntemi tercih edilmiştir. Simülasyon çalışmaları boyunca, üç farklı ekran malzemesi dikkate alınmıştır. Bunlardan ikisi Magnetil ve DX52 olarak isimlendirilmiş ferromanyetik malzemelerdir. Bu iki ferromanyetik malzeme Arcelor-Mittal firması tarafından

üretmiş ticari kullanımdaki malzemelerdir. DX52, malzemesi sıcak haddelenmiş galvanizli demir olan bir malzemedir. Magnetil malzemesi ise oldukça düşük karbonlu bir çelik malzeme olup; düşük artık miktarıslanma, düşük manyetik alanlarda yüksek manyetik geçirgenlik ve yüksek doyum gibi spesifik manyetik karakteristiğe sahip bir malzemedir. Ferromanyetik malzemeler doğrusal olmayan manyetik geçirgenliğe sahiptirler. Bu iki malzeme için, bağıl manyetik geçirgenliğin manyetik akı yoğunluğuna bağlı değişimi Şekil 2’de gösterilmiştir. DX52 malzemesi için iletkenlik değeri 6.48 MS/m, Magnetil malzeme için 8.50 MS/m’dir. Diğer bir ekran malzemesi olarak alüminyum kullanılmıştır. Alüminyum, yüksek elektriksel iletkenlikli ferromanyetik olmayan bir malzeme olup bağıl manyetik geçirgenliği  $\mu_r=1$  ve elektriksel iletkenliği  $\sigma=36$  MS/m olarak bilinmektedir [15].



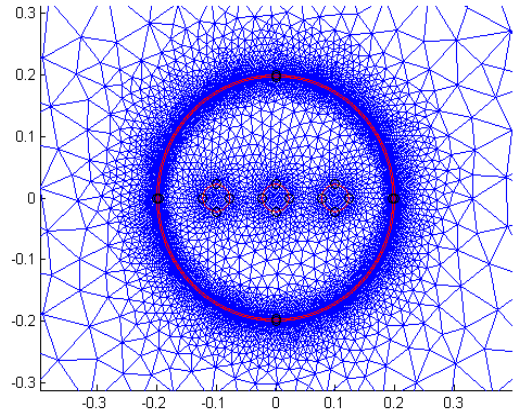
Şekil 2: Manyetik akı yoğunluğunun fonksiyonu olarak bağıl manyetik geçirgenliğin değişimi.

Yeraltı kabloları için silindirik ekranlamanın modellenmesi ve çözümlerinde, sonlu elemanlar programı olan "COMSOL Multiphysics, Version 3.5a" kullanılmıştır. Bu yazılım, fizik tabanlı sistemlerin benzetim ve modellemesinde kullanılan bir mühendislik, tasarım ve sonlu eleman analiz yazılımıdır. Esnek ve basit kullanım özelliği sayesinde karmaşık problemler rahatlıkla modellenebilmektedir. Ayrıca sürüm 3.5a’da MATLAB ile birlikte çalışabilen COMSOL Script özelliği bulunmaktadır. Bu özellik, programın kodlarla yazılabilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece, parametrik modelleme çalışmaları daha kolay ve hızlı yapılabilmektedir.

Yeraltı kabloları için ekranlama hesaplamalarında iki boyutlu (2B) zaman-harmonikli (time-harmonic) manyetodinamik SEY modeli kullanılmıştır. Manyetodinamik 2B SEY modeli,

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) + j\omega \sigma \vec{A} = \vec{J}_e \quad (3)$$

formülünü kullanır [15]. Burada,  $\omega$  açısal frekans,  $\sigma$  iletkenlik,  $\mu$  magnetik geçirgenlik,  $J_e$  dış akım yoğunluğu olup ve manyetik vektör potansiyeli  $\vec{A} = A_z \vec{I}_z$  sistem bilinmeyenidir. Modellenen sistemde, silindirik ekranlı güç kabloları ve etrafındaki boşluktaki sonlu elemanlar ağına ilişkin bir örnek Şekil 3’te gösterilmiştir. Bu model için, 2B SEY 62.021 serbestlik derecesine (degrees of freedom) sahiptir. Görüldüğü gibi kablolarının meydana getirdiği alan seviyesini düşürmek için kablolar silindirik yapıli bir ekran içerisine yerleştirildiği varsayılmıştır.



Şekil 3: Üç fazlı yeraltı kabloları ve ekrandan oluşan 2B SEY’in ağ yoğunluğuna ilişkin bir örnek.

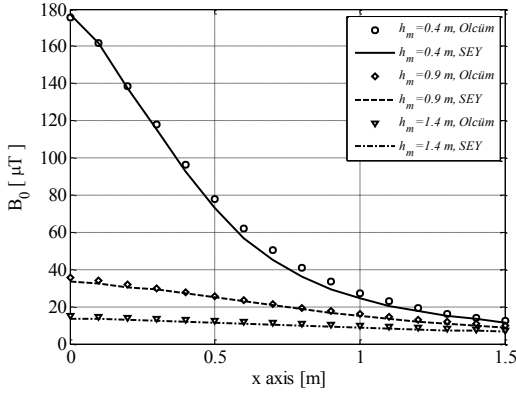
#### 4 Parametrik Analiz ve Tartışmalar

Yeraltı kabloları tarafından üretilen şebeke frekanslı manyetik alan seviyeleri birkaç  $\mu\text{T}$  veya daha fazla olabilmektedir. Bu alan seviyesi kablolardan geçen akımın genliğine, kablolar arası mesafeye, kabloların yerleştirilme düzenine göre değişmektedir. Güç kabloları veya yeraltı kablolarının oluşturduğu ve dış ortama doğru yayılan bu alan seviyelerini azaltmak için manyetik ekranlama tekniği etkin bir çözüm olarak kullanılmaktadır. Bu amaçla literatür ve uygulamada farklı geometrilere sahip bir çok ekran geometrisi vardır. Bu çalışmaların birinde yeraltı U-biçimli oluk ve üzeri düz plaka şeklinde kapaklı ekran yapısına ait ekranlama çalışması yapılmış ve prototip ölçekli bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Ekransız duruma ait SEY modeli bu deney düzeneğindeki geometrik ölçü ve verilere bağlı olarak modellenmiştir. Akım taşıyan baralar dikdörtgen kesitli olup  $2 \times 50$  mm boyutlu, baralar arası mesafe 0.1 m, üç fazlı akımlar dengeli ve geçen akımın genliği 750 A rms’dir [14],[15]. Ekransız duruma ait deneysel ölçüm sonuçları ve hesaplanan manyetik akı yoğunluğunun x-ekseni boyunca değişimi  $h_m = 0.4$  m,  $h_m = 0.9$  m ve  $h_m = 1.4$  m için Şekil 4’te verilmiştir. Görüleceği gibi SEY modeli hesaplama sonuçlarıyla deneysel ölçümler iyi bir şekilde uyumaktadır. Bu sonuçlar SEY hesaplamalarının güvenilirliğini doğrulamaktadır. Ayrıca, Şekil 4’ten görüleceği üzere manyetik akı yoğunluğu kaynağa olan uzaklığa güçlü bir şekilde bağlıdır. Örneğin gözlem noktası  $h_m = 0.4$  m iken maksimum akı yoğunluğu yaklaşık 176  $\mu\text{T}$  olmasına karşın 1.5 m iken bu değer yaklaşık 15  $\mu\text{T}$ ’ya düşmektedir.

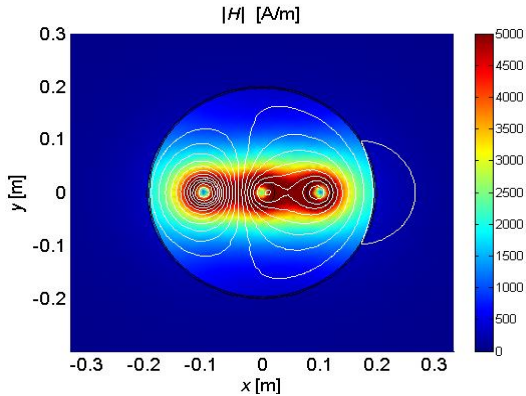
Bu çalışmada, silindirik yapıli ekran geometrisi ele alınarak birçok parametreye bağlı ekranlama analizleri yapılmıştır. Silindirik yapıli ekranlamada ferromanyetik malzemeler olan DX52, Magnetil ve yüksek iletkenlikli malzeme olan alüminyum gibi üç farklı ekran malzemesinin ekranlama performansı incelenmiştir. Aksi belirtilmedikçe yapılan simülasyon çalışmalarında sistem geometrisi ve kabloların yerleşim düzeni Şekil 1’de ki gibi, sisteme ait büyüklük ölçüleri ise Tablo 1’de verildiği gibi alınmıştır. Şekil 5’te alüminyum ekrandan oluşan silindirik ekranlamada manyetik alan dağılımının her hangi bir anına ait örnek görülmektedir.

Ekranlama performansını etkileyen en önemli faktörlerden biriside malzemelerin elektriksel ve manyetik özellikleridir. Bu nedenle ekranlama sonrası alan azalımının değeri kullanılan ekran malzemesinin türüne göre değişiklik gösterecektir. Ekransız durum ve ekranlama sonrasına ait

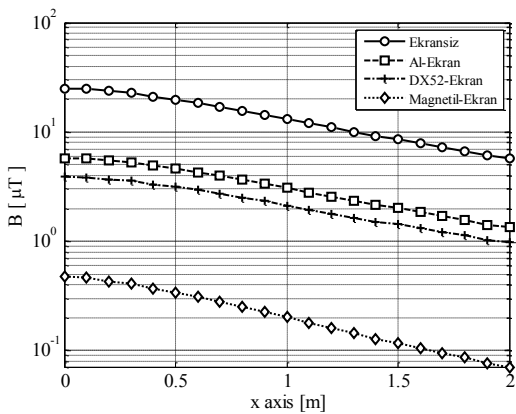
manyetik akı yoğunluğunun x-ekseni boyunca değişimi Şekil 6'da gösterilmiştir. Burada hesaplama yükseklği  $h_m = 1$  m, fazlar dengeli ve geçen akımın genliği 750 A rms'dir. Gözlem noktası  $x = 0$  m ve  $h_m = 1$  m için ekransız durumdaki alan değeri  $25 \mu\text{T}$  iken ekranlı durumda bu değer alüminyum için  $7.73 \mu\text{T}$ , DX52 ekran için  $3.78 \mu\text{T}$  ve Magnetil ekran için  $0.48 \mu\text{T}$  olmaktadır. Kabloları çevreleyen silindirik biçimli ekran dış ortama yayılan alan seviyesini önemli ölçüde azaltmaktadır.



Şekil 4: Ekransız durum için hesaplanan ve deneysel ölçülen manyetik akı yoğunluklarının x-ekseni boyunca değişimi.



Şekil 5: Silindirik yapılu alüminyum ekranlamada manyetik alan dağılımının her hangi bir anına ait örnek  $\{I_1 = \sqrt{2} \cdot 750 \sin(\omega t + 0), I_2 = \sqrt{2} \cdot 750 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})\}$  ve  $I_3 = \sqrt{2} \cdot 750 \sin(\omega t + 2\pi/3)$  A}



Şekil 6: Ekransız ve farklı ekran malzemeleri için manyetik akı yoğunluğunun değişimi.

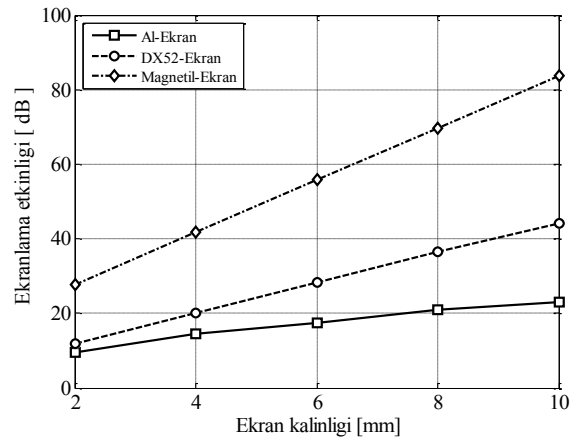
Tablo 2'de her üç ekran malzemesinin silindirik ekranlamadaki performansları karşılaştırılmaları olarak verilmiştir. Aynı sistem geometrisi ve büyüklükler için Magnetil ekran 36 dB, DX52 ekran 16 dB ve alüminyum ekran 13 dB'lik bir azaltma sağlamaktadır. Açıkça anlaşılmaktadır ki ferromanyetik ekranlar, özellikle ekran malzemelerinin kaynağa yakın olması durumunda daha iyi ekranlama sağlamaktadır. Tablo 2'den görüldüğü üzere en iyi alan azaltması Magnetil ekranla sağlanmaktadır. Magnetil ekran ile ortalama alan seviyesinde yaklaşık 66 katlık bir azaltma sağlanmaktadır. Bu oran DX52 için 6 kat alüminyum ekran için ise 4.3 kat olmaktadır. Bu simülasyon şartlarında Magnetil malzeme için bağıl manyetik geçirgenliğin ortalama değeri 930 iken diğer ferromanyetik malzeme olan DX52 için bu değer 282 olmaktadır.

Tablo 2: Silindirik ekranlamada farklı ekran malzemelerinin ekranlama etkinliğinin karşılaştırılması.

Ekran Türü	$\mu_r$ -avg	$B_{avg}$ [T]	$J_{avg}$ [A/m <sup>2</sup> ]	SE [dB]
Alüminyum	1	$6.69 \times 10^{-4}$	$3.15 \times 10^5$	13
DX52	282	0.07	$1.31 \times 10^5$	16
Magnetil	930	0.09	$9.44 \times 10^4$	36

#### 4.1 Ekran Kalınlığının Ekranlama Üzerindeki Etkisi

Ekranlama performansını etkileyen önemli parametrelerden biriside ekran kalınlığıdır. Bu kısımda ekran kalınlığının ekranlama üzerindeki etkisi üç farklı ekran malzemesi (alüminyum, DX52 ve Magnetil) için incelenmiştir. Sistem büyüklükleri Tablo 1'de verildiği gibi olup değişken parametresi olarak kalınlık ele alınmıştır. Ekran kalınlığı 0.2 mm ile 10 mm aralığında değiştirilmiştir. Ekran kalınlığına bağlı olarak farklı ekran malzemelerin ekranlama etkinliğinin değişimi Şekil 7'de gösterilmektedir. Silindirik ekran için ekranlama performansı tüm malzemeler için kalınlığa bağlı olarak artış göstermiştir. Örneğin 4 mm ekran kalınlığında ekranlama etkinliği alüminyum ekran için yaklaşık 17 dB, DX52 ekran için 20 dB ve magnetil ekran için ise 41 dB civarında bir azalma sağlamaktadır. Ekranlama performansı artan ekran kalınlığına bağlı olarak artmasına rağmen pratik uygulamalarda ekran kalınlığının çok büyük seçilmesi maliyet ve uygulama zorlukları bakımından çok tercih edilir bir durum değildir. Şebeke frekanslı ekranlama uygulamalarında 20 dB bir azalma çoğunlukla yeterli olmaktadır. Bu nedenle optimum ekran kalınlığı seçiminde bu değer dikkate alınmalıdır.

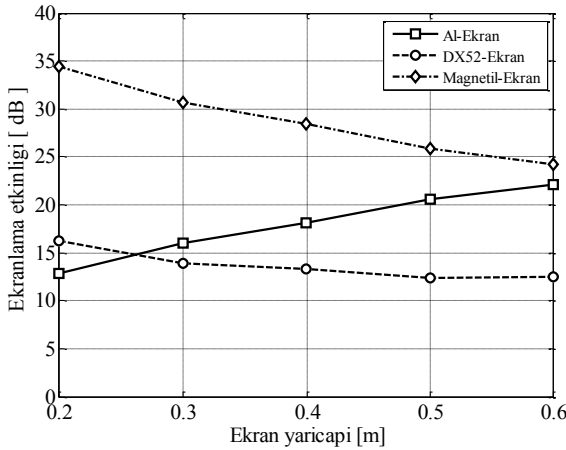


Şekil 7: Ekranlama etkinliğinin ekran kalınlığına bağlı değişimi.



#### 4.2 Ekran Yarıçapının Ekranlama Üzerindeki Etkisi

Yeraltı kablolarının silindirik ekranlama ile yapılması durumu için farklı ekran malzemelerindeki ekranlama etkinliği performansını analiz etmek için değişken parametresi olarak ekran yarıçapı ele alınmıştır. Sistem büyüklükleri Tablo 1'de verildiği gibi olup değişken parametresi ekran yarıçapı 0.2 m ile 6 m aralığında değiştirilmiştir. Ekran yarıçapına bağlı olarak farklı ekran malzemelerin ekranlama etkinliğinin değişimi Şekil 8'de gösterilmektedir. Şekil 8'den açıkça görülmektedir ki ekranlama etkinliği, yarıçapa bağlıdır ve alüminyum ekranda artarken diğer iki ekranda azalmaktadır. Ferromanyetik malzeme olan DX52 ve Magnetil ekranda ekran çapının büyümesine bağlı olarak ekranlama etkinliğinin azalması beklenen bir sonuçtur. Çünkü bu malzemelerin manyetik geçirgenlikleri lineer olmayan bir özellik gösterip manyetik alan seviyesine bağlı olarak değişmektedirler. Bu kapsamda çap büyüdükçe ekran kaynak alandan uzaklaşacak ve silindirik ekran içerisindeki manyetik indüksiyonda buna bağlı olarak azalacaktır. Bu da ekranın manyetik geçirgenliğinin düşmesi anlamına gelir. Bunun sonucu olarak ferromanyetik malzemelerle yapılan ekranlamada çapın büyümesi ekranlama etkinliğini azaltır. Buna karşın yüksek iletkenli bir malzeme olan alüminyum ekranda ise çapın büyümesi ekranlama etkinliği artırmaktadır. Bunun sebebi ise ekran yüzeyinin büyümesine bağlı olarak indüksiyon akımlarının artmasıyla açıklanır.

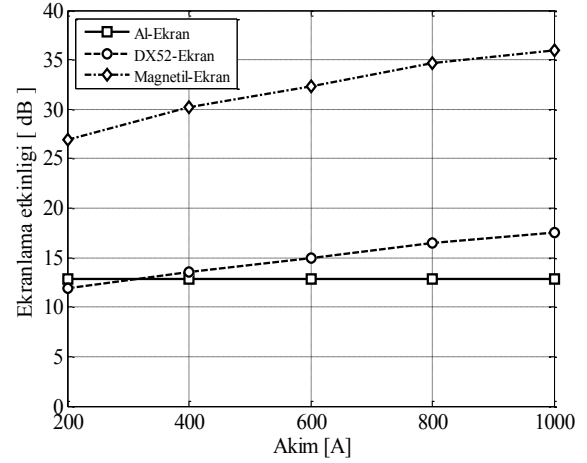


Şekil 8: Ekranlama etkinliğinin ekran yarıçapına bağlı değişimi.

#### 4.3 Akım Genliğinin Ekranlama Üzerindeki Etkisi

Bu kısımda ise akım genliğinin silindirik yapıli ekranlama üzerindeki etkisi üç farklı ekran malzemesi (alüminyum, DX52 ve Magnetil) için incelenmiştir. Ekran geometrisi Şekil 1'de, boyutlar ve ölçüler Tablo 1'de verildiği gibidir. Değişken parametresi olarak kablolardan geçen akımın genliği ele alınmıştır. Kablolardan geçen akım üç fazlı ve dengeli olup akımın genliği 200 A ile 1000 A rms arasında 200 A basamaklarla değiştirilmiştir. Akımın genliğine bağlı olarak farklı ekran malzemelerinin ekranlama faktörünün değişimi Şekil 9'da görülmektedir. Ferromanyetik ekran olan DX52 ve Magnetil için ekranlama performansı akımın genliğine bağlı olarak artmaktadır. Bunun sebebi, bu ekranlardaki manyetik indüksiyon ve bağıl manyetik geçirgenlik arasındaki bağıntıyla açıklanır. Manyetik alana bağlı olarak bağıl manyetik geçirgenlikte bir artış meydana gelmektedir. Bu nedenlerden dolayı ferromanyetik malzemelerde akımın artışıyla birlikte

ekranlama performansı yükselme gösterecektir. Fakat Şekil 9'dan görüleceği gibi alüminyum ile yapılan ekranlamada, akımın genliğindeki artışla ekranlama faktörü değişmemekte ve sabit kalmaktadır. Bu durum alüminyum ekranın elektriksel ve manyetik özelliklerinin doğrusallığıyla açıklanmaktadır.



Şekil 9: Ekranlama etkinliğinin akıma bağlı değişimi.

### 5 Sonuçlar

Bu çalışmada, yeraltı kabloların ekranlamasında kullanılabilecek silindirik yapıli ekran problemi parametrik olarak incelenmiştir. Daha açık bir ifadeyle ekranlama etkinliği performansı ekranın yarıçapı, ekranın kalınlığı, akımın genliği gibi parametrelere bağlı incelemeler için ikisi ferromanyetik (DX52, Magnetil) biri yüksek iletkenlikle (alüminyum) olmak üzere üç farklı ekran malzemesi için analiz edilmiştir. Silindirik ekranlamada, bu parametrelerinin farklı ekran malzemelerindeki davranışlarının incelenmesi konunun pratik uygulayıcılarına bir rehber niteliğindedir. Kullanılan bu ekran malzemeleri, ekranlama etkinliği açısından karşılaştırıldığında en iyi performansı Magnetil ekranda gözlenmiştir. Ekranlama parametresinden biri olan bağıl geçirgenliğin lineer olmayan değişimi ferromanyetik malzemelerde ekranlama etkinliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle ferromanyetik ekrandan oluşan ekranlamada bağıl geçirgenlik değerinin manyetik alana bağlı değişimi mutlaka göz önüne alınmalıdır.

Genel bir değerlendirme yapılırsa, manyetik kaynağa yakın ekranlama uygulamalarında ferromanyetik malzemeler tercih edilmelidir. Çünkü ekranın bağıl manyetik geçirgenliği kaynağa yakın olması durumunda yüksektir. Tam tersi durumlarda, yani ekranın kaynak bölgesinden uzaklaşmasıyla birlikte geçirgenlik değeri azalmakta ve buna bağlı olarak ekranlama performansı önemli ölçüde düşmektedir. Kaynaktan uzak yerde ekran kullanılması durumunda ise yüksek iletkenlikli malzemelerin seçilmesi ekranlama performansı bakımından daha etkili olacaktır.

### 6 Teşekkür

Bu çalışma; TÜBİTAK, Bilim İnsanı Destekleme Dairesi Başkanlığı'nca yürütülmekte olan 2214-Yurt Dışı Araştırma Burs Programı kapsamında Belçika-Ghent Üniversitesi, Electrical Energy Laboratory'da 16/02/2009-16/02/2010 tarihleri arasında desteklenmiştir.

## 7 Kaynaklar

- [1] ICNIRP, "Guidelines for Limiting Exposure to Time Varying Electric Magnetic and Electromagnetic Fields (upto 300 GHz)". *Health Physics*, 74(4), 494-522, 1998.
- [2] Sevgi L. "Çevremizdeki Elektrik ve Manyetik Alanlar". *Endüstriyel & Otomasyon*, 2005.
- [3] Levy S. "Electromagnetic Shielding Effect of an Infinite Plane Conducting Sheet Placed between Circular Coaxial Cables". *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 21, 923-941, 1936.
- [4] Schelkunoff SA. *Electromagnetic Waves*, 1st Ed. New York, USA, D. Van Nostrand Company, 1943.
- [5] Schultz RB, Plantz VC, Brush DR. "Shielding Theory and Practice". *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 30(3), 187-201, 1988.
- [6] Hasselgren L, Luomi J. "Geometrical Aspects of Magnetic Shielding at Extremely Low Frequencies". *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 37(3), 409-420, 1995.
- [7] Tekin I, Newman EH. "Moment Method Analysis of the Magnetic Shielding Factor of a Conducting TM Shield at ELF". *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 38(4), 585-590, 1996.
- [8] Olsen RG, Istenic M, Zunko P. "On Simple Methods for Calculating ELF Shielding of Infinite Planar Shields". *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 45(3), 538-547, 2003.
- [9] Istenic M, Olsen RG. "A Simple Hybrid Method for ELF Shielding by Imperfect Finite Planar Shields". *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 46(2), 199-207, 2004.
- [10] Yenikaya S. "An Efficient Hybrid MoM/FEM Method for Analyzing the Enclosures with Apertures". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(3), 117-122, 2011.
- [11] Koroglu S, Sergeant P, Umurkan N. "Comparison of Analytical, Finite Element and Neural Network Methods to Study Magnetic Shielding". *Simulation Modeling Practice and Theory*, 18(2), 206-216, 2010.
- [12] Du Y, Burnett J. "Magnetic Shielding Principles of Linear Cylindrical Shield at Power-Frequency". *IEEE 1996 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Santa Clara, California, USA, 19-23 August 1996.
- [13] Pino-Lopez JC, Cruz-Romero P, Serrano-Iribarnegaray L, "Impact of Electromagnetic Losses in Closed Two-Component Magnetic Shields on the Ampacity of Underground Power Cables". *Progress in Electromagnetics Research*, 135, 601-625, 2013.
- [14] Sergeant P, Koroglu S. "Electromagnetic Losses in Magnetic Shields for Buried High Voltage Cables". *Progress in Electromagnetics Research-PIER*, 115, 441-460, 2011.
- [15] Köroğlu S. Elektrik Güç Sistemlerinde Manyetik Alan Ekranlanmasının İncelenmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2010.